



EESTI MAAÜLIKOOL

Metsandus- ja maaehitusinstituut

Metsakasvatuse ja metsaökoloogia õppetool

Rene Puhke

**ERINEVATE UUENDUSRAIETE MÕJU PUISTU SÜSINIKU
VARUDELE JA VOOGUDELE**

**THE EFFECT OF DIFFERENT REGENERATION CUTTINGS
ON STAND CARBON STORAGE AND FLUXES**

Magistritöö

Metsanduse õppekava

Juhendajad: Professor Veiko Uri, *PhD*

Teadur Mats Varik, *PhD*

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Autor: Rene Puhke		Õppekava: Metsamajandus	
Pealkiri: Erinevate uuendusraiete mõju puistu süsiniku varudele ja voogudele			
Lehekülgi: 28	Jooniseid: 0	Tabeleid: 9	Lisasid: 1
Osakond / Õppetool: Metsakasvatus ja metsaökoloogia ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 1.5 metsateadus (B430 Metsakasvatus, metsandus, metsandustehnoloogia) Juhendaja(d): Veiko Uri, Mats Varik Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2021			
<p>Harilik mänd on üks levinumaid ja majanduslikult olulisemaid puuliike Eesti metsades. Tänapäeval on ühiskonnas aktuaalne teema turberaiete laiem kasutamine, milles nähakse alternatiivi lageraie. Samas on teadmised turbe- ning lageraie mõjust palumännikute süsinikuvarudele ja süsiniku sidumisele ebapiisavad.</p> <p>Magistritöö peamiseks eesmärgiks oli hinnata, kuidas muutub metsade süsinikuvaru ja süsiniku sidumine turbe- ja lageraie järgselt, st milline on süsiniku sidumise dünaamika erinevate raietega uuendatud palumännikutes.</p> <p>Puude maapealse biomassi ja selles talletatud süsiniku koguse hindamiseks kasutati mudelpuude meetodit. Kokku analüüsiti 28 mudelpuud kaheksalt erinevalt katsealalt, mis kasvasid pohla kasvukohtatüübis RMK Võrumaa metskonnas. Uuritud aegjärgse raiega majandatud palumännikutes oli puudes talletatud süsiniku varu varieeruv, sõltudes kõige enam vanametsa rinde ja üksikpuude olemist.</p> <p>Aladel, kus eelmise põlvkonna mets oli suures osas säilinud, jäi süsiniku varu vahemikku 11,6-51,8 t C ha⁻¹, kuid oli madalam nendel aladel, kus vanametsa põlvkonna puud puudusid (2,5 t C ha⁻¹) või kasvasid üksikpuudena ja domineeris männi looduslik uuendus. Lageraie järgselt uuenenud männinoorendikes oli C varu väiksem (5,5-10,8 t C ha⁻¹) kui aegjärgse raie aladel.</p> <p>Aastane süsiniku sidumise voog oli lageraiega uuendatud aladel üle kahe korra suurem (2,2-4,1 t C ha⁻¹ a⁻¹) kui turberaie aladel (1,0-1,8 t C ha⁻¹ a⁻¹), mille peamiseks põhjuseks on aegjärgse raie aladel ebaühtlane uuendus ja puude aeglasem kasv.</p>			
Märksõnad: Harilik mänd, süsiniku varu, süsiniku sidumine, aegjärgne raie, lageraie			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Master's Thesis	
Author: Rene Puhke		Curriculum: Forest management	
Title: The effect of different regeneration cuttings on stand carbon storage and fluxes			
Pages: 28	Figures: 0	Tables: 9	Appendixes: 1
Department / Chair: Silviculture and Forest ecology Field of research and (CERC S) code: 1.5 forest sciences (B430 silviculture, forestry, forest technology Supervisors: Veiko Uri, Mats Varik Place and date: Tartu, 2021			
<p>Scots pine is one of the most common as well as one of the most commercially important tree species in Estonian forestry. During last decades a critical attitude to clear-cutting in the Estonian society revealed, stimulating searches for alternative forest management method and often shelterwood cutting suggested as a closer-to-nature forest managements method. However, sustainable forest management presumes the existence of scientific knowledge of all impacts of different management methods, among of them effect to C accumulation. There is still a lack of relevant studies estimating the response of different management practices to forest C cycling on the regional level.</p> <p>The aim of this Master's thesis was to estimate the effect of shelterwood and clear-cutting to the dynamics of carbon storages and fluxes of pine stands in <i>Vaccinium</i> forests site type.</p> <p>The model tree method was used to estimate above-ground biomass and biomass production of studied stands.</p> <p>In total, 28 model trees were selected from 8 different study sites from <i>Vaccinium</i> forest site type in Võrumaa RMK forest district. The carbon storages in aboveground biomass of stands varied in the analysed pine forests, relating to presence of trees from previous forest generation.</p> <p>In the shelterwood area, where the old forest trees had been existed, the C storages remained in the range of 11.6-51.8 t C ha⁻¹ and C storage was lower in the area where only the natural regeneration of pine (2.5 t C ha⁻¹) was presented. After the clearfelling the C storages of young stands was lower than in the shelterwood areas (5.5-10.8 t C ha⁻¹).</p> <p>Annual carbon accumulation was more than 2 times higher in the stands regenerated by clear-cutting (2.2-4.1 t C ha⁻¹ a⁻¹), compared by the shelterwood areas (1.0-1.8 t C ha⁻¹ a⁻¹). The lower</p>			

carbon accumulation in shelterwood site was caused by lower production capacity of old trees as well as insufficient natural regeneration of regrowth trees.

Keywords: Scots pine, carbon storages, carbon accumulation, shelterwood cutting, clear-cut

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	6
1. MATERJAL JA METOODIKA	8
1.1 Katsealad	8
1.1.1 Turberaie katsealad	8
1.1.2 Lageraie katsealad	10
1.2 Puude maapealse biomassi ja produktsiooni hindamine	11
2. TULEMUSED JA ARUTELU.....	13
2.1 Puude maapealne biomass ja produktsioon.....	13
2.1.1 Puistu maapealne biomass ja produktsioon turberaie aladel	14
2.1.2 Lageraie järgselt uuenenud noorendike maapealne biomass ja produktsioon.....	16
2.2 Süsiniku varud puude maapealses biomassis ja aastane süsiniku sidumine.....	16
2.2.1 Süsiniku varud ja sidumine puudes turberaie järgselt	17
2.2.2 Süsiniku varud ja sidumine puudes lageraie järgselt.....	19
KOKKUVÕTE.....	21
VIIDATUD ALLIKAD.....	23
LISAD	27
Lisa 1. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	28

SISSEJUHATUS

Eesti ühiskonnas on viimastel aastatel muutunud aktuaalseks lageraietele alternatiivsete raieviiside otsimine ning nende laiema kasutamise propageerimine. Alternatiivsetest uuendusraieviisidest omavad suuremat rakenduslikku tähtsust turberaied, mida on võimalik kasutada ennekõike palumännikute majandamisel. Varasemates uurimistöodes märgitakse, et männi loodusliku uuenduse saamine metsamaal on võimalik peamiselt väherohtuvatel liivmuldadel, kus on tegemist õhukese samblakatte ja kõduhorisondiga, aga ka märgadel muldadel turbasambla eluskattega (Laas & Väärt 2004), siit ka põhjus, miks on aegjärkseid raieid kõige enam rakendatud palumetsades.

Turberaiete üks olulisemaid eeliseid lageraie ees on metsa loodusliku uuenemisvõime ära kasutamine ja seeläbi uuenduskulude vähenemine, samuti on turberaie maastikus oluliselt vähem häirivam kui lageraie. Peamiseks puuduseks on konkurentsist tingitud ebaühtlane uuendus ning selle aeglasem areng, samuti kannatab uuendus järgmise raiejärgu läbi viimisel, lisaks on raietööde teostamine turberaiete puhul komplitseeritum ja seetõttu ka kulukam (Laas *et al.* 2011). Varasemal perioodil on Eesti metsateadlased olnud turberaiete osas pigem kriitilised (Etverk 2007), kuid on neis näinud teatud perspektiivi kaitstavate metsade majandamisel (Örd 2000). Seoses teema aktuaalsuse suurenemisega on Eesti metsateadlastelt just viimastel aastatel ilmunud uusi turberaiet käsitlevaid uurimusi (Tullus *et al.* 2019; Rosenväld *et al.* 2020; Tishler *et al.* 2020).

Lisaks metsakasvatustlikele ja looduskaitselikele aspektidele mõjutab tänapäevast metsandust laiemalt ka globaalne kliimapoliitika, sest just boreaalsetes ja hemiboreaalsetes metsadel nähakse olulist rolli süsiniku (C) sidumisel ja seeläbi kliimamuutuste leevendamisel (Dixon *et al.* 1994; Goodale *et al.* 2002; Gough *et al.* 2008; Pan *et al.* 2011). Metsad akumulēerivad süsiniku nii kasvavasse biomassi (Ågren & Hyvonen 2003; Laiho *et al.* 2003; Uri *et al.* 2012) kui ka mulda (Körner 2006; Hartmann *et al.* 2013). Samas sõltub metsade süsiniku sidumise võime suurel määral metsade majandamisest ning sellest tulenevalt arvestatakse erinevate majandusmeetodite planeerimisel ning rakendamisel üha enam ka nende globaalset rolli süsiniku sidumisel.

Kui lageraie järgselt muutub ala vahetult süsinikku siduvast ökosüsteemist süsiniku allikaks (Amiro *et al.* 2010; Goulden *et al.* 2010; Noormets *et al.* 2015), siis turberaietes nähakse säästvat majandamismeetodit, kus peale raiet säilitab mets suures osas jätkuvalt süsinikku siduva seisundi. Samas võib pikemas ajaperspektiivis lageraie järgselt taastunud uus metsaökosüsteem olla efektiivsem süsiniku talletaja kui turberaie puhul (Tishler *et al.* 2020), kuid võrdlevaid uuringuid lage- ja turberaiejärgsete metsade arengudünaamikate kohta on maailmas väga vähe.

Pärast esimest raiejärku langeb metsa süsiniku sidumise võime vähenenud biomassi ja primaarproduktiooni tõttu. Et vanad raieküpsed metsad on sageli tasakaaluseisundis või talitlevad isegi C allikana (Ryan *et al.* 1997; Goulden *et al.* 2010; Kriiska *et al.* 2019), siis puistu aastase produktioonivõime vähenemine võib viia metsa C bilansi miinusesse, eriti kui hõredaks raiumise tulemusena muutuvad mikrokliimaatilised tingimused – sealhulgas võib mullatemperatuuri tõus intensiivistada mullahingamist (Dean *et al.* 2016; James & Harrison 2016). Aegjärksel raiel tuleb arvestada ka tulevaste – teise ja kolmanda raiejärgu tekitatud häiringutega, mis mõjutavad oluliselt uuenduse kasvu (Lee *et al.* 2002; Christophel *et al.* 2013; Marozas *et al.* 2018).

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli hinnata, kuidas muutuvad metsade süsinikuvaru ja süsiniku sidumine puistus turbe- ja lageraie järgselt ning milline on süsinikusidumise dünaamika uuendatud palumännikutes.

Eesti metsanduses on männikud väga olulisel kohal, statistilise metsainventeerimise (SMI) andmetel on Eestis kõige enam just männikuid, nad moodustavad metsade pindalast 31% ja tagavarast 35% ning kõige enam kasvab neid palumetsades (40%) (Aastaraamat Mets 2019).

Puistu raiejärgsel biomassi- ja juurdekasvudünaamikal on oluline roll süsinikusidumise taastumisel ja see aspekt on ka käesoleva töö fookuses. Teema on äärmiselt aktuaalne, kuna tänapäeval on turberaiete laiem kasutamine metsanduses ühiskonnas käimasoleva metsasõja taustal muutunud järjest suuremat kõlapinda leidvaks ideeks, milles nähakse alternatiivi lageraiele. Samas on turberaieid uuritud vähe, aga kaasaegne metsamajandus peaks olema ennekõike teaduspõhine.

Käesoleva magistritöö autor avaldab tänu prof. Veiko Urile ning tema poolt juhitud töörühmale, kes aitasid töö valmimisele kaasa.

1. MATERJAL JA METOODIKA

1.1 Katsealad

1.1.1 Turberaie katsealad

Uuringu läbi viimiseks valiti välja viis aegjärgse raiega majandatud pohla kasvukohatüübi männikut RMK Võrumaa metskonnas. Kõikidel valitud aladel alustati aegjärksete raietega umbes kakskümmend aastat tagasi. Katsealadele rajati proovitükid 2020. aasta suvel ja sügisel (tabel 1) ning neil mõõdeti kasvavate puude diameetrid ja kõrgused. Puistud olid väga erineva arenguga, mõnes neist eelmise metsapõlvkonna puud peaaegu puudusid ja domineeris noor metsapõlvkond, mõnes aga oli olukord vastupidine, sellepärast on eraldi kirjeldatud mõlemad puistuelemendid (tabel 1). Uuenduse hindamiseks rajati igale katsealale neli ringproovi raadiusega 2-4 meetrit, mis paigutati proovitükki läbivatele diagonaalidele juhuslikult. Mõõdeti kõikide ringi sisse jäänud järelkasvumändide kõrgus ja kõrguse juurdekasv.

Tabel 1. Aegjarkse raie katsealade iseloomustus (H – keskmine kõrgus, m, ± standardviga; S – proovitüki pindala, ha; D_{1.3} – keskmine rinnasdiameeter, cm, ± standardviga; N – puude arv, tk ha⁻¹; G – rinnaslõikepindala, m² ha⁻¹; Raie – aegjarkse raie esimene raiejärk; T – puistu täius, %)

	Arenguklass	H	S	Vanus	D	N	G	Raie	T
QB 238-5	Küps mets	26 (±0,82)	0,2	119	34,3 (±0,92)	156	15	2006	41
	Järelkasv	0,9 (±0,04)		15	-	28648	-		-
QB 259-1	Noorendik	1,3 (±0,16)	0,2	16	2,7 (±0,24)	6101	-	2004	-
	-	-		-	-	-	-		-
QB 153-1	Noorendik	0,4 (±0,02)	0,2	19	-	3610	-	2001	-
	Küpsmets	24 (±0,82)		149	29,0 (±0,91)	278	17		47
QB 154-7	Noorendik	1,0 (±0,04)	0,2	24	-	2650	-	2001	-
	Üksikpuud	25 (±0,82)		159	43,5 (±1,07)	20	3		8
QB 174-10	Küps mets	26 (±0,82)	0,2	139	33,6 (±0,92)	181	16	2007	44
	Järelkasv	0,5 (±0,03)		14	-	9422	-		-

QB 238-5 alal alustati turberaiega 2006. a, sellele järgnes maapinna ettevalmistamine ja II raiejärk viidi läbi 2014. a. Kuna alal on uuenemine olnud ebapiisav, siis oli kavas teostada 2021. a. lageraie, mis katseala rajamisega tõttu lükati edasi.

QB 259-1 alal alustati turberaiega 2004. a, 2005. a. tehti maapinna ettevalmistamine ja II raiejärk viidi läbi 2012. a., 2019. a teostati sanitaarraie tormikahjustuse likvideerimiseks.

QB 153-1 alal alustati aegjarkse raiega 2005. a. ning samal aastal tehti maapinna mineraliseerimine. Teine raiejärk tehti antud alal 2006. a. ning vahepealsel perioodil tehti kaks korda sanitaarraiet (2010, 2019 a.), valgustusraie teostati 2017 aastal.

QB 154-7 alal on samuti tehtud kaks raie järku (2001, 2013), – maapinna mineraliseerimine teostati pärast esimest järku. Alal on kaks korda on tehtud sanitaarraiet (2005, 2010), valgustusraie teostati 2017 aastal.

QB 174-10 alal teostati aegjärgne raie (2007), peale seda tehti ka maapinna mineraliseerimine, hiljem teostati sanitaarraie ja seejärel määrati ala sihtkaitsevööndisse, kus on kaitse eesmärgiks kaitsta metsist (Timmase LKA, Kaldsihi skv) ning metsamajanduslik tegevus on siin edaspidi keelatud.

1.1.2 Lageraie katsealad

Katsealadeks valiti välja kolm lageraiejärgselt uuenenud männi-noorendikku, ligikaudse vanusega 15 aastat (tabel 2). Kõik alad olid kultiveeritud istutamise või külvi teel. Ka nendele aladele rajati proovitükid, kus mõõdeti kõikide kasvavate puude rinnasdiameetrid, kõrgused ja viimase aasta juurdekasvud.

Tabel 2. Lageraiejärgselt uuendatud katsealade iseloomustus (H – keskmine kõrgus, m, \pm standardviga; S – proovitüki pindala, ha; $D_{1,3}$ – keskmine rinnasdiameeter, cm, \pm standardviga; N – puude arv, tk ha⁻¹; G – rinnaslõikepindala, m² ha⁻¹; Raie – lageraie aasta)

	Arenguklass	H	S	Vanus	$D_{1,3}$	N	G	Raie
KJ 036-7	Noorendik	5,0 ($\pm 0,31$)	0,1	15	7,0 ($\pm 0,31$)	2336	8,9	2005
PW 012-1	Noorendik	4,0 ($\pm 0,26$)	0,1	14	4,5 ($\pm 0,28$)	2756	5,4	2006
QB154-7	Noorendik	4,4 ($\pm 0,22$)	0,1	15	4,1 ($\pm 0,12$)	2600	4,1	2005

Kõikidel lageraiega uuendatud katsealadel oli teostatud vähemalt üks valgustusraie.

1.2 Puude maapealse biomassi ja produktsooni hindamine

Puistute maapealset biomassi ja produktsooni hinnati mudelpuude meetodil (Bormann & Gordon 1984; Uri 2017, 2019; Silm 2018; Nokkur 2019), mis võimaldab saada hinnangud biomassi fraktsioonide lõikes, kuid on töömahukas meetod. Suuremate puude puhul valiti igalt katsealalt 2 mudelpuud, mis langetati ja fraktsioneeriti. Mudelpuude valikul eeldati, et puude kasv ja biomassi allokatsioon on sama vanuse ja kasvukohatüübiga katsealadel sarnane. Kuna tegemist oli vanade metsadega ja mudelpuud suurte mõõtmetega, siis on nende fraktsioneerimine ja analüüs töömahukas. Suurema arvu mudelpuude langetamine oleks põhjustanud puistutes ka arvestatava häiringu, seega valiti puid piiratud arv igalt alalt, kuid tagades võimalikult hea esindatuse puude diameetrite jaotuses. Mudelpuude valikul vältiti puid, mis kasvasid metsaservas. Erinevates puistutes kasutati maapealse biomassi hindamiseks ühist koondmudelit. Mudelpuud langetati võimalikult maapinna lähedalt ning mõõdeti nende pikkus. Tüvi jagati sektsioonideks: esimene tüvesektsioon 0-1,3 m ja sealt edasi lõigati 1 m pikkused sektsioonid kuni elusvõra alguseni, elusvõra omakorda jagati neljaks võrdseks sektsiooniks. Kõik sektsioonid kaaluti ning peale kaalumist saeti metsas sektsioonidest analüüsikettad hilisemaks tüvepuidu ja -koore osakaalu hindamiseks, samuti kuivaine määramiseks laboris.

Tüvepuidu produktsooni hindamiseks radiaalkasvu põhjal võeti kettad kännult, 1,3 m kõrguselt, tüve keskelt ja elusvõra algusest. Oksad kaaluti sektsioonide kaupa ja igast võrasektsioonist valiti üks keskmine mudeloks, mis toimetati edasiseks fraktsioneerimiseks ja analüüsiks laboratooriumi. Kõik puu kuivanud oksad kaaluti koos ja neist võeti mudeloks kuivmassi määramiseks. Laboris eraldati mudelokstel jooksva aasta võrsed, jooksva aasta okkad, vanemad oksad ja vanemad okkad. Kõik fraktsioonid kaaluti eraldi ja neist eraldati kuivmassi ning C sisalduse määramiseks alamproov (10-40 g). Alamproov kaaluti täpsusega 0,01 g ja kuivatati kuivatusahjus 70 °C juures kuni püsiva kaalu saamiseni ja seejärel kaaluti uuesti 0,01 g täpsusega.

Lageraiejärgsete noorendike ja samuti turberaiealade järelkasvu puhul jagati fraktsioonideks kogu mudelpuu (tüvi, oksad, võrsed, okkad).

Kõik saadud tulemused koondati MS Exceli keskkonda, kus arvutati erinevate fraktsioonide kuivmassid, samuti proovitükil kasvavate puude biomassid ja nende aastased produktsoonid.

Puistu maapealse biomassi hindamiseks koostati regressioonivõrrandid, mis kirjeldavad puu maapealse biomassi ning tüvemassi sõltuvust rinnasdiameetrist või kõrgusest, samuti aastast tüvepuidu juurdekasvu. Kasutati allomeetrilist seost üldkujul (1).

$$y=ax^b \quad (1)$$

Kus, y – on puu maapealse osa biomass, tüvemass või tüvepuidu juurdekasv (g)

x – puu rinnasdiameeter (cm) või kõrgus (m)

a ja b – võrrandi parameetrid

Mudeli (1) põhjal arvutati iga proovitükil kasvava puu maapealne biomass ja nende summeerimisel saadi puistu maapealse osa biomass ($t\ ha^{-1}$). Erinevate fraktsioonide biomassid arvutati nende keskmise osakaalu järgi mudelpuudel.

Süsiniku sisaldus erinevates fraktsioonides analüüsiti Eesti Maaülikooli Taimebiokeemia Laboratooriumis.

Puude tüvepuidu produktsiooni hinnati analüüsiketastelt mõõdetud radiaaljuurdekasvude põhjal, nende mõõtmiseks kasutati programmi WinDendro (Regent Instruments Inc.), mis võimaldab aastarõngaid mõõta täpsusega kuni 0,001 mm. Tulemuste põhjal arvutati tüvepuidu viimase viie aasta keskmine juurdekasv (2) (Whittaker & Woodwell 1968).

$$\Delta W = W_0(r^2 - (r-i)^2)/r^2, \quad (2)$$

kus ΔW on puidu kuivaine aastane juurdekasv g;

W_0 – puidu kuivmass g;

r – analüüsitava ketta raadius mm;

i – viimase viie aasta keskmine aastarõnga laius mm

Tüvekoore produktsiooni hindamisel eeldati, et tüvepuidu ja koore juurdekasv kulgevad proportsionaalselt. Okste aastase produktsiooni juurdekasvu hindamiseks kasutati tüvepuidu produktsiooni ja biomassi suhtarvu (Uri *et al.* 2017). Mudelpuude fraktsioneerimisel eraldati viimase aasta võrsed ja jooksva aasta okkad ning nende fraktsioonide aastane produktsioon on võrdne nende biomassiga. Arvutati puistu C sidumise efektiivsus, mis iseloomustab, kui palju ühe süsiniku või biomassi tonni kohta ökosüsteemis seotakse aastas süsinikku.

2. TULEMUSED JA ARUTELU

2.1 Puude maapealne biomass ja produktsioon

Käesolevas töös kasutati allomeetrilist seost astmefunktsiooni kujul, mis kirjeldab hästi puude biomassi sõltuvust rinnasdiameetrist (Hytönen *et al.* 1995; Lõhmus *et al.* 1996; Telenius 1999; Aun *et al.* 2021). Leitud seosed olid tugevad, mida näitavad kõrged determinatsioonikordaja (R^2) väärtused (tabel 3), samuti olid kõik kasutatud mudelid statistiliselt olulised $p < 0,05$. Vaid tüvepuidu aastast produktsiooni kirjeldava mudeli determinatsioonikordaja oli madalam (tabel 3). Vana metsapõlvkonna mudelpuude keskmine vanus oli 100 aastat.

Tabel 3. Kasutatud regressioonvõrrandite parameetrid ja determinatsioonikordajad (R^2). AR S – aegjärgse raie suured (vanametsa) mudelpuud, AR V – aegjärgse raie järelkasvu mudelpuud, LR – mudelpuud lageraiejärgselt uuendatud aladel, x – argumenttunnus, a ja b – parameetrid; $D_{1,3}$ – puu rinnasdiameeter, H – puu kõrgus, BM – biomass

		Maapealne BM			Tüvepuidu produktsioon			Tüvemass		
Alad	x	a	b	R^2	a	b	R^2	a	B	R^2
AR S	$D_{1,3}$	235,99	2,22	0,94	346,87	0,76	0,56	210,29	2,22	0,93
AR V	H	178,64	2,17	0,80	16,83	2,43	0,78	66,98	2,60	0,79
LR	$D_{1,3}$	301,11	1,82	0,92	36,69	1,64	0,88	131,11	1,92	0,88

Keskmine mudelpuu biomass ja standardviga vanametsa puude puhul oli 520 ± 63 kg, millest tüvemass moodustas 470 ± 57 kg ja noorendikes olid vastavad puude keskmised biomassid $3,1 \pm 0,7$ kg (LR) ja $1,6 \pm 0,4$ kg (AR).

2.1.1 Puistu maapealne biomass ja produktsioon turberaie aladel

Puistu põhirinne

Vana metsapõlvkonna (vastavalt puistu põhirinne või üksikpuude rinne) puude maapealsest biomassist moodustas suurema osa (ca. 90%) tüvi, millest koore osakaal oli 6% (tabel 4). Olulise osa puude biomassist moodustasid oksad 8%, okkad moodustasid 2%. Käesolevas uurimustöös käbisid ja kuivanud oksa biomassi arvutamisel arvesse ei võetud. Käbide osakaal kogu puude biomassist oli marginaalne ja selle ignoreerimine ei tekitanud märkimisväärset viga. Kuivanud oksa ei arvestatud, kuna tegu pole elusa massiga.

Puude aastane produktsioon on üks olulisemaid tegureid metsade süsiniku (C) sidumise seisukohalt. Kuna puude netoproduktsioon on otseselt seotud nende biomassiga, siis moodustas ka aastasest produktsioonist suurima osa tüvede produktsioon.

Vana metsa maapealne biomass jäi kolmel alal suurusjärku 100 t ha^{-1} , kuid ühel (QB 259-1) turberaie alal puudus vanamets üldse, selle ala põhirinde kohta andmed tabelis 4 puuduvad. Ühel katsealal oli puistu maapealne biomass ($20,15 \text{ t ha}^{-1}$) aga kordades väiksem, sest antud alal oli korduvalt läbi viidud sanitaarraie ja eelmisest metsapõlvkonnast oli alles vaid üksikpuud (tabel 1).

Tabel 4. Aegjärgse raiega majandatud puistute põhirinde biomass ja aastane produktsioon fraktsioonide lõikes (BM – biomass, t ha^{-1} ; PR – aastane produktsioon, $\text{t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)

Fraktsioon	BM				PR			
	QB 238-5	QB 154-7	QB 153-1	QB 174-10	QB 238-5	QB 154-7	QB 153-1	QB 174-10
Tüvepuud	80,09	16,99	90,96	87,44	0,78	0,12	1,14	0,89
Tüvekoor	5,29	1,12	6,01	5,78	0,05	0,01	0,08	0,06
Viimase aasta okkad	0,76	0,16	0,86	0,83	0,76	0,16	0,86	0,83
Võrsed	0,19	0,04	0,22	0,21	0,19	0,04	0,22	0,21
Vanad okkad	0,76	0,16	0,86	0,83	-	-	-	-
Oksad	7,88	1,67	8,95	8,61	0,08	0,01	0,11	0,09
Kokku	94,97	20,15	107,87	103,70	1,86	0,34	2,41	2,07

Puistute põhirinde aastane produktsioon oli kolmel alal (põhirinne oli säilinud puistuna) suurusjärgus 2 t ha⁻¹ a⁻¹ ning 0,34 t ha⁻¹ a⁻¹ alal, kus põhirinne oli säilinud üksikpuude rindena.

Järelkasv ja uuenemine

Kolmel uuritud aegjärgse raie alal, kus puistud olid küllaltki tihedad ja arvestava täiusega (tabel 1) oli järelkasvu areng puudulik, taimed olid madalad, samuti oli keskmine aastane ladvavõrse pikkuskasv väike. Kahel alal, kus eelmise põlvkonna mets oli säilinud vaid üksikpuudena või puudus hoopis, oli uuendus aga tihedam ja vitaalsem (tabel 1).

Järelkasvu puude biomassist moodustas suurima osa samuti tüvepuit (55%), millest aga koore osakaal oli tunduvalt suurem (21%), kui esimese põlvkonna puudel (tabel 5). Nende maapealsest biomassist moodustasid okkad 25% ja oksad 16%.

Tunduvalt madalam oli järelkasvu puude biomass puistus QB 174-10, kuna pärast esimest raie arvati see ala sihtkaitsevööndisse ning järgmised raiejärgud jäid tegemata ja uuenemine oli seega pärsitud.

Vanametsa puude oluline mõju uuenduse kasvule ilmnas uurimistöös, kus võrreldi erinevaid turberaieliike, neist parim oli kõrguskasv veerraie alal. Kultuuride kõrguskasvu hinnati kuue raiejärgse aasta jooksul, kus aegjärgse raie alal oli puude kõrguskasv 47% madalam veerraie ala keskmisest (Tishler *et al.* 2020), mis sarnaneb turberaietest kõige enam lageraiele, kuid langi suurus on väiksem.

Tabel 5. Järelkasvu maapealse osa biomass ja aastane produktsioon aegjärgse raiega majandatud puistutes (BM – biomass, t ha⁻¹; PR – aastane produktsioon, t ha⁻¹ a⁻¹)

Fraktsioon	BM					PR				
	QB 238-5	QB 154-7	QB 153-1	QB 174-10	QB 259-1	QB 238-5	QB 154-7	QB 153-1	QB 174-10	QB 259-1
Tüvepuit	2,32	1,89	0,69	0,30	2,29	0,54	0,48	0,15	0,06	0,66
Tüvekoor	0,63	0,52	0,19	0,08	0,62	0,15	0,13	0,04	0,02	0,18
Viimase aasta okkad	0,85	0,69	0,25	0,11	0,83	0,85	0,69	0,25	0,11	0,83
Võrsed	0,20	0,17	0,06	0,03	0,20	0,20	0,17	0,06	0,03	0,20
Vanad okkad	0,47	0,39	0,14	0,06	0,47	-	-	-	-	-
Oksad	0,86	0,70	0,26	0,11	0,85	0,20	0,18	0,06	0,02	0,25
Kokku	5,33	4,35	1,59	0,69	5,25	1,94	1,64	0,56	0,24	2,13

2.1.2 Lageraie järgselt uuenenud noorendike maapealne biomass ja produktsioon

Lageraie järgselt uuenenud noorendikes moodustas puude biomassist suurima osakaalu samuti tüvepuuit (51%), ka teiste fraktsioonide osas oli jaotus üsna sarnane AR alade järelkasvu puudega: okkad moodustasid 26% ja oksad-võrsed kokku 23%. Noorendike maapealne biomass varieerus (tabel 6), sõltuvalt puistu tihedusest ja keskmisest kõrgusest (tabel 2). Märkimisväärse osa aastasest produktsioonist moodustas noorendikes okaste ja jooksva aasta võrsete produktsioon (tabel 6), mis on männinoorendikele ka iseloomulik (Uri *et al.* 2019). Lati- ja keskealistes männikutes suureneb tüve ja okste osakaal ning vastavalt okaste osakaal kogu puu massist väheneb (Aun *et al.* 2021).

Tabel 6. Puude maapealne biomass ja aastane produktsioon lageraie järgselt uuenenud aladel (BM – biomass, t ha⁻¹; PR – aastane produktsioon, t ha⁻¹ a⁻¹)

Fraktsioon	BM			PR		
	KJ036-7	PW012-1	QB154-7	KJ036-7	PW012-1	QB154-7
Tüvepuuit	8,94	5,94	4,61	1,86	1,34	1,07
Tüvekoor	2,46	1,64	1,27	0,51	0,37	0,29
Viimase aasta okkad	3,91	2,60	2,02	3,91	2,60	2,02
Võrsed	1,31	0,87	0,67	1,31	0,87	0,67
Vanad okkad	1,82	1,21	0,94	-	-	-
Oksad	3,85	2,56	1,98	0,80	0,58	0,46
Kokku	22,29	14,80	11,48	8,40	5,76	4,51

2.2 Süsiniku varud puude maapealses biomassis ja aastane süsiniku sidumine

Süsiniku (C) varude arvutamiseks puude erinevates fraktsioonides kasutatakse sageli keskmist C sisaldust 50% (Gower *et al.* 2001; Kenina *et al.* 2018), kuid puuliikide ja fraktsioonide lõikes võib see varieeruda üsna suures vahemikus 44-55%, mistõttu sageli määratakse konkreetne C sisaldus laboratoorselt (Bert & Danjon 2006; Zhang *et al.* 2009). Käesolevas töös määrati männi biomassi fraktsioonide C sisaldus (tabel 7)

elementaaranalüsaatoril ja saadud tulemused olid heas kooskõlas varasemas magistritöös Eesti palumännikutes leitud C sisaldusega, mis oli madalaim tüvekoos (45,4%) ja kõrgeim on saadud jooksva aasta okastest (49,8%) (Uri *et al.* 2019), samuti Poola vastavas uurimuses tooduga (Weigiel & Polowy 2020).

Tabel 7. Süsiniku kontsentratsioon erinevates biomassi fraktsioonides (C – süsiniku kontsentratsioon (%); SE – standardviga)

Fraktsioon	C %	SE
Tüvepuit	46,92	± 0,15
Tüvekoor	49,19	± 0,87
Viimase aasta okkad	49,27	± 0,47
Vanad okkad	49,23	± 0,74
Oksad	49,06	± 0,75
Võrsed	49,70	± 0,84

2.2.1 Süsiniku varud ja sidumine puudes turberaie järgselt

Kuna süsiniku varu puudes sõltub otseselt nende biomassist, siis oli suurim C varu neis puistutes, kus vanametsa rinne oli säilinud. QB 259-1 katsealal suured puud puudusid, seetõttu moodustas kogu puudes seotud C varu uuenduses talletatud süsinik (tabel 8). Alal QB 154-7 esines vanu puid üksikpuudena ja seetõttu oli C varu puudes madalam võrreldes nende puistutega, kus vanametsa rinne oli säilinud (tabel 8).

Tabel 8. AR alade süsiniku varud ja sidumine puude maapealses osas ning sidumise efektiivsus (C_{varu} – süsiniku varu, $t\ C\ ha^{-1}$; C_{sidumine} – aastane süsiniku sidumine, $t\ C\ ha^{-1}\ a^{-1}$; C_{effekt} – C sidumise efektiivsus $t\ t^{-1}$)

Ala	C_{varu}			C_{sidumine}			C_{effekt}
	Suured puud	Järelkasv	Kokku	Suured puud	Järelkasv	Kokku	
QB238-5	44,9	2,6	47,5	0,9	0,9	1,8	0,04
QB154-7	9,5	2,1	11,6	0,2	0,8	1,0	0,09
QB153-1	51,0	0,8	51,8	1,2	0,3	1,4	0,03
QB174-10	49,0	0,3	49,3	1,0	0,1	1,1	0,02
QB259-1	-	2,5	2,5	-	1,0	1,0	0,40
Keskmine	38,6	1,7	32,5	0,8	0,6	1,3	0,12

Süsiniku sidumise osas on tulemused varieeruvad. Üldine metsanduslik teadmine on, et vanades metsades, sh männikutes aastane jooksev juurdekasv langeb, seda näitavad erinevad männikute kasvukäigutabelid (Metsataksaatori teatmik 1971) ja sellega seoses väheneb ka aastane C sidumine vanametsa puistutes (Kriiska *et al.* 2019). Küpses eas männikute madal aastane juurdekasv ja C sidumine leidis kinnitust ka käesolevas töös (tabel 8).

Kuna turberaie peamiseks eesmärgiks on metsa uuendamine looduslikul teel, siis kogu puistus seotud C sõltub ka järelkasvupuude aastasest juurdekasvust, mis oli aga väga varieeruv (tabel 8). QB238-5 alal oli vana metsa täius küll 41% (tabel 1), kuid puistu oli ebahühtlane, selles esines häile, mis olid suhteliselt hästi uuenenud, järelkasvu tihedus ($28\ 648\ tk\ ha^{-1}$) oli töös uuritud aladest kõrgeim (tabel 1), mis omakorda tagas vanametsaga samas suurusjärgus C sidumise järelkasvu puudes. Järelkasvu osa kogu puistu poolt seotavast C kogusest oli domineeriv vaid kahel alal, kus vanametsa puud olid säilinud üksikpuudena või puudusid üldse. Tabelis 8 toodud puistu süsiniku sidumise efektiivsus (C_{effekt}) iseloomustab, kui palju ühe süsiniku või biomassi tonni kohta ökosüsteemis aastas süsinikku seotakse. Enamike uuritud turberaiealade puhul jäi see vahemikku $0,02\text{--}0,09\ t\ t^{-1}$, vaid sellel alal kus vanametsa puud puudusid ja kogu aastase juurdekasvu moodustasid järelkasvupuud oli see oluliselt kõrgem ($0,4\ t\ t^{-1}$). See näitab, et kuigi turberaie järgselt säilinud vanametsa biomass ja C kogus selles on suured, on nende C sidumise võime tagasihoidlik.

2.2.2 Süsiniku varud ja sidumine puudes lageraie järgselt

Lageraie järgselt uuenenud alad olid sarnase vanusega, kuid erinesid tiheduse ja keskmise kõrguse osas (tabel 2). Võrreldes lageraiega uuendatud puistute arengut nende turberaie aladega, kus vanamets oli olulises osas säilinud, oli lageraiejärgsetel aladel puudes talletatud C varu kordades madalam. Kuid võrreldes neid noorendikke kahe aegjärgse raie puistuga (QB154-7 ja QB259-1), kus vanamets on asendumas uue põlvkonnaga, siis on lageraie järgselt tekkinud noorendikes puude C varu suurem (tabelid 8 ja 9).

Tabel 9. Süsiniku varud, sidumine ning efektiivsus sidumisel lageraie järgselt uuenenud männinoorendikes (C_{varu} – süsiniku varu, t C ha^{-1} ; C_{sidumine} , $\text{t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$; C_{effekt} – C sidumise efektiivsus t t^{-1})

Ala	C_{varu}	C_{sidumine}	C_{effekt}
KJ036-7	10,8	4,1	0,38
PW012-1	7,2	2,8	0,39
QB154-7	5,5	2,2	0,40
Keskmine	7,8	3,0	0,39

Aastane C sidumine puudesse oli lageraie järgselt uuenenud noorendikes suurem aegjärgsete alade puistutest. Kui aastane puude maapealses biomassis seotud C voog kolme ala keskmisena oli $3 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (tabel 9), siis turberaie aladel oli vanametsa puude C sidumine maapealses biomassis nelja uuritud ala keskmisena $0,8 \text{ C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (vahemikus $0,2\text{--}1,2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) ning järelkasvu puude vastav keskmine $0,6 \text{ C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (vahemikus $0,1\text{--}1,0 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Ka nende kahe puistuelemendi summaarne C sidumine jääb alla lageraie järgselt uuenenud noorendike C sidumisele.

Siinkohal tuleb silmas pidada, et enamikus aegjärgse raie aladel alustati uuendamisega ca 20 aastat tagasi, uuritud lageraiealad aga on vanuses ca 15 aastat.

Puistu süsiniku sidumise efektiivsus puude maapealses biomassis oli lageraiealade puhul keskmiselt $0,39 \text{ t t}^{-1}$, st. ühe maapealses biomassis oleva orgaanilise süsiniku tonni kohta seoti aastas lisaks 0,39 tonni, turberaiealadel on see näitaja kordades väiksem (tabel 8).

Seega on 15-20 aastat peale raieid oluliselt tõhusam C siduja lageraie järgselt uuenenud männinoorendikud kui aegjärgse raiega majandatud männikud.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli hinnata, kuidas muutub metsade süsinikuvaru ja süsiniku sidumine puistus turberaie ja lageraie järgselt ning milline on süsinikusidumise dünaamika uuendatud palumännikutes.

Puistute maapealse biomassi hindamiseks rakendati mudelpuude meetodit, milleks kasutati kokku 28 erineva mudelpuu andmeid. Eraldi analüüsiti mudelpuid aegjärgse raiega majandatud puistute põhirindest, aegjärgse raie järelkasvust ja lageraie järgselt uuenenud noorendikest. Mudelpuude fraktsioonidest moodustas suurima osakaalu tüvemass, mis kasvas puistu vananedes. Noorendikes moodustasid puistu maapealsest biomassist olulise osa okkad ja võrsed.

C varu uuritud palumännikutes oli varieeruv, sõltudes kõige enam vanametsa põhirinde ja üksikpuude olemist. C varu nendel aegjärgse raie (AR) aladel, kus vanametsa puud olid rohkem või vähem säilinud, jäi see vahemikku $11,6\text{--}51,8 \text{ t C ha}^{-1}$ ning oli kordades madalam alal, kus vanametsa puud puudusid ja kasvas vaid männi looduslik uuendus ($2,5 \text{ t C ha}^{-1}$). Aegjärgse raie aladega võrreldes oli lageraie järgselt uuenenud männinoorendikes C varu puude maapealses biomassis oluliselt väiksem (kolme ala keskmisena $7,8 \text{ t C ha}^{-1}$).

Kuid süsiniku sidumise osas ületasid lageraiejärgselt uuenenud puistud aegjärgse raie alasid: kolme uuritud ala keskmisena sidusid noorendikud $3 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($2,2\text{--}4,1 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), ületades summaarset sidumist turberaiealade puudes (keskmise $1,3 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, so vanametsa puud pluss uuendus) üle 2 korra. Siinkohal peab ka arvestama, et lageraie alade vanus on suurusjärgus 15 aastat, aegjärgse raiega alustati aga ca 20 aastat tagasi.

Käesolevas töös uuritud turberaieatega majandatud puistud varieerusid säilinud vanametsa ja tekkinud uuenduse osas, kuid jäid selgelt maha aastase C sidumise osas lageraie järgselt uuenenud noorendikest. Süsiniku varud olid aegjärgse raie aladel küll suuremad, kuid see erinevus edaspidi tasandub iga järgneva aastaga. Süsiniku sidumise efektiivsus puistu maapealses osas oli lageraiealade puhul keskmiselt $0,39 \text{ t t}^{-1}$, turberaie aladel keskmine aga

0,12 t t⁻¹ ehk üle kolme korra madalam. Turberaiega majandatud metsadele oli iseloomulik ebaühtlane uuendus ja järelkasvu puude aeglasem kasv.

VIIDATUD ALLIKAD

- Aastaraamat Mets 2019. (Yearbook Forest 2019)./ Toim. Raudsaar, M., Valgepea, M. Tallinn: Keskkonnaagentuur. pp. 22.
- Ågren, G.I., Hyvönen, R.** (2003). Changes in carbon stores in Swedish forest soils due to increased biomass harvest and increased temperatures analysed with a semi-empirical model. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 174, pp 25–37
- Amiro, B.D., Barr, A.G., Barr, J.G., Black, T.A., Bracho, R., Brown, M., Chen, J., Clark, K.L., Davis, K.J., Desai, A.R., Dore, S., Engel, V., Fuentes, J.D., Goldstein, A.H., Goulden, M.L., Kolb, T.E., Lavigne, M.B., Law, B.E., Margolis, H.A., Martin, T., McCaughey, J.H., Misson, L., Mounts-helu, M., Noormets, A., Randerson, J.T., Starr, G., Xiao, J.** (2010). Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbance in forests of North America. – *Biogeosciences*. Vol. 115.
- Aun, K., Kukumägi, M., Varik, M., Becker, H., Aosaar, J., Uri, M., Morozov, G., Buht, M., Uri, V.** (2021). Short-term effect of thinning on the carbon budget of young and middle-aged Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 492, pp. 119-241.
- Bert, D., Danjon, F.** (2006). Carbon concentration variations in the root, stem and crown of mature *Pinus pinaster*. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 222, pp. 279–295.
- Bormann, B. T., Gordon J. C.** (1984). Stand density effects in young red alder plantations: productivity, photosynthate partitioning and nitrogen fixation. – *Ecology*. Vol. 65, pp. 394–402.
- Christophel, D., Spengler, S., Schmidt, B., Ewald, J.** (2013). Customary selective harvesting has considerably decreased organic carbon and nitrogen stocks in forest soils of the Bavarian Limestone Alps. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 305, pp. 167–176.
- Dean, C., Kirkpatrick, J.B., Friedland, A.J.** (2016). Conventional intensive logging promotes loss of organic carbon from the mineral soil. – *Global Change Biology*. Vol. 23, pp. 1–11.
- Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., Wisniewski, J.** (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. – *Science*. Vol. 263, pp. 185–190.
- Etverk, I.** (2007). Väike metsanduskursus. Tartu: Riigimetsa Majandamise Keskus. pp. 55.
- Goodale, C.L., Apps, M.J., Birdsey, R.A., Field, C.B., Heath, L.S., Houghton, R.A., Jenkins, J.C., Kohlmaier, G.H., Kurz, W., Liu, S.R., Nabuurs, G.J., Nilsson, S., Shvidenko, A.Z.**

- (2002). Forest carbon sinks in the Northern Hemisphere. – *Ecological Applications*. Vol 12, No. 3, pp. 891–899.
- Gough C. M., Vogel, Christoph., Schmid, H., Curtis, P.** (2008). Controls on annual forest C storage: lessons from the past and predictions for the future. – *Bioscience*. Vol. 58, pp. 609–621.
- Goulden, M., Mcmillan, A.M.S., Winston, G.C., Rocha, A.V., Manies, K.L., Harden, J.W., Bond-Lamberty, B.** (2010). Patterns of NPP, GPP, respiration, and NEP during boreal forest succession. – *Global Change Biology*. Vol. 17, pp 588–871.
- Gower, S.T., Krankina, O., Olson, R.J., Apps, M., Linder, S., Wang, C.** (2001). Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. – *Ecological Applications*. Vol. 11, pp. 1395–1411.
- Hartmann DL., Tank, A., Rusticucci, M.** (2013). IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: *The Physical Science Basis*. – IPCC AR5. pp. 31–39.
- Hytönen, J., Saarsalmi, A., Rossi, P.** (1995). Biomass production and nutrient uptake of short-rotation plantations. – *Silva Fennica*. Vol. 29, No. 2, pp. 117–139.
- James, J.N., Harrison, R.B.** (2016). The Effect of Harvest on Forest Soil Carbon: A Meta-Analysis. – *Forests*. Vol. 7, pp. 308
- Kenina L., Elferts D., Baders E., Jansons A.** (2018). Carbon pools in hemiboreal over-mature Norway Spruce stands. – *Forests*. Vol 9, pp. 435.
- Krigul, T.** (1971). Metsataksaatori teatmik. Tartu: Eesti Põllumajanduse Akadeemia. 150 lk.
- Kriiska, K., Frey, J., Asi, E., Kabral, N., Uri, V., Aosaar, J., Varik, M., Napa, Ü., Apuhtin, V., Timmusk, T., Ostonen, I.** (2019). Variation in annual carbon fluxes affecting the SOC pool in hemiboreal coniferous forests in Estonia. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 433, pp. 419–430.
- Körner, C.** (2006). Plant CO₂ responses: an issue of definition, time and resource supply. – *New Phytologist*. Vol. 172, pp 393–411.
- Laas, E., Uri, V., Valgepea M.** (2011). Metsamajanduse alused: õpik kõrgkoolidele. Tartu Ülikooli Kirjastus.
- Laas, E., Väärt, T.** (2004). Turberaied männikutes ja männiuuenduse tekkimine turberaiealadel. – *Metsanduslikud uurimused*. Vol. 41, pp. 86 – 100.
- Laiho, R., Sanchez, F., Tiarks, A., Dougherty, P.M., Trettin, C.C.** (2003). Impacts of intensive forestry on early rotation trends in site carbon pools in the southeastern US. – *Forest Ecology and Management*. Vol 174, pp 177–189.
- Lee, K., Choi, S-D.** (2002). Large rate of uptake of atmospheric carbon dioxide by planted forest biomass in Korea. – *Global Biogeochemical Cycles*. Vol. 16, pp. 36–41.
- Lõhmus, K., Mander, Ü., Tullus, H., Keedus, K.** (1996). Productivity, buffering capacity and resources of grey alder forests in Estonia. In: Perttu, K., Koppel, A. (eds.). Short rotation willow

- coppice for renewable energy and improved environment. – *Proceedings of a joint Swedish – Estonian seminar on energy forestry and vegetation filters*. Uppsala, Sweden, pp. 95–105.
- Marozas, V., Sasnauskiene, J., Dautarte, A., Gavenauskas, A., Sabiene, N., Armolaitis, K.** (2018). Effect of shelterwood cuttings on soil chemical properties in scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) forests in europe's hemiboreal zone, in lithuania. – *Journal of Elementology*. Vol. 23, pp. 353–367.
- Nokkur, A.** (2019). Süsiniku sidumine ja varud erineva vanusega jänese kapsa kasvukohatüübi kuusikute (*Picea abies* [L.] KARST) maa pealses biomassis. Magistritöö, Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 25 lk.
- Noormets, A., Epron, D., Domec, J.C., McNulty, S.G., Foc, T., Sun, G., King, J.S.** (2015). Effects of forest management on productivity and carbon sequestration: A review and hypothesis. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 355, pp 124–140.
- Pan, Y., Birsey, R., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P., Kurz, W., Philips, O.** (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. – *Science*. Vol. 333, pp. 988–993. Ågren & Hyvonen, 2003; Laiho et al. 2003; Uri et al. 2012
- Rosenvald, R., Tullus, H., Lõhmus, A.** (2020). Is shelterwood harvesting preferable over clear-cutting for sustaining deadwood pools? The case of Estonian conifer forests. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 429, pp 375–383.
- Ryan, R.M., Kuhl, J., Deci, E.L.** (1997). Nature and Autonomy: An Organizational View of Social and Neurobiological Aspects of Self-Regulation in Behavior and Development. – *Development and Psychopathology*. Vol. 9, pp. 701–728.
- Silm, D.** (2018). Hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) maa pealne ja maa-alune biomass ning selles seotud süsinikuvaru mustika kasvukohatüübis. Magistritöö, Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 28 lk.
- Zhang, Q., Wang, C., Wang, X., Quan, X.,** (2009). Carbon concentration variability of Chinese temperate tree species. – *Forest Ecology and Management*. Vol 258, No 5, pp. 722–727.
- Telenius, B. F.** (1999). Stand growth of deciduous pioneer tree species on fertile agricultural land in southern Sweden. – *Biomass and Bioenergy*. Vol. 16, pp. 13–23.
- Tishler, M., Tullus, T., Tullus, A., Jäärats, A., Lutter, R., Lundmark, T., Tullus, H.** (2020) Effects of shelterwood method and plant stock type on the early growth and survival of pine seedlings in regeneration stands under hemiboreal conditions. – *Scandinavian journal of forest research*. Vol. 35, pp 85–95.
- Tullus, T., Tishler, M., Rosenvald, R., Tullus, A., Lutter, R., Tullus, H.** (2019). Early responses of vascular plant and bryophyte communities to uniform shelterwood cutting in hemiboreal Scots pine forests. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 440, pp 70–78.
- Uri, V., Kukumägi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Aun, K., Krasnova, A., Morozov, G., Ostonen, I., Mander, Ü., Lõhmus, K., Rosenvald, K., Kriiska, K., Soosaar, K.** (2019). The

- carbon balance of a six-year-old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) ecosystem estimated by different methods. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 433, pp. 248–262.
- Uri, V., Kukumägi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Morozov, G., Karoles, K.,** (2017). Ecosystems carbon budgets of differently aged downy birch stands growing on well-drained peatlands. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 399, pp. 82–93.
- Uri, V., Varik, M., Aosaar, J., Kanal, A., Kukumägi, M., Lõhmus, K.** (2012). Biomass production and carbon sequestration in a fertile silver birch forest chronosequence. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 267, pp. 112–126.
- Weigiel, A., Polowy, K.** (2020). Aboveground carbon content and storage in mature scots pine stands of different densities – *Forest*. Vol 11, pp. 240
- Whittaker, R. H., Woodwell, G. M.** (1968). Dimension and production relations of trees and shrubs in the Brookhaven forest, New York. – *Ecology*. Vol. 56, pp. 1–25.
- Örd, A.** (2000). Kaitsemetsad ja nende majandamine Eestis. Tallinn: Keskkonnaministeerium. pp 234.

LISAD

Lisa 1. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Rene Puhke

(16.08.94 39408164914)

1. Annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

Erinevate uuendusraiete mõju puistu süsiniku varudele ja voogudele, mille juhendajaks on Professor Veiko Uri ja Teadur Mats Varik,

1.1 salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2 digiarhiivi DSpace lisamiseks

1.3 veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 31.05.19

Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)